

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL**

**TEMA:
“CORRELACIÓN ENTRE EL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO
(DCP) Y LA RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) EN CAMPO
PARA EL SUELO DE SUBRASANTE DE LA VIA PORTOVIEJO-MANTA”.**

**AUTORES:
CASTILLO MOREJÓN JOAN ALBERTO
MENA GARZÓN LENIN HERNAN**

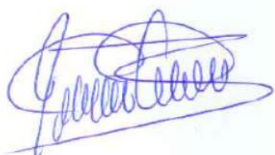
**DOCENTE TUTOR:
HUGO FLORENCIO TORRES MERINO**

Quito, Agosto de 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Castillo Morejón Joan Alberto ; Lenin Hernan Mena Garzón , con documentos de identificación N° 150068507-6 ; 171999052-3 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: **CORRELACIÓN ENTRE EL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (DCP) Y LA RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) EN CAMPO PARA EL SUELO DE SUBRASANTE DE LA VIA PORTOVIEJO-MANTA**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil , en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Nombre: Castillo Morejón Joan Alberto

Cédula: 150068507-6

Fecha: Quito, agosto 2019



Nombre: Mena Garzón Lenin Hernan

Cédula: 171999052-3

Fecha: Quito, agosto 2019

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo Torres Merino Hugo Florencio declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico: **CORRELACIÓN ENTRE EL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (DCP) Y LA RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) EN CAMPO PARA EL SUELO DE SUBRASANTE DE LA VIA PORTOVIEJO-MANTA** , realizado por Castillo Morejón Joan Alberto ; Lenin Hernan Mena Garzón , obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, agosto 2019



Torres Merino Hugo Florencio

CI: 171477197-7

“CORRELACIÓN ENTRE EL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (DCP) Y LA RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) EN CAMPO PARA EL SUELO DE SUBRASANTE DE LA VIA PORTOVIEJO-MANTA”

"CORRELATION BETWEEN THE DYNAMIC CONE PENETROMETER (DCP) AND THE CALIFORNIA SUPPORT RATIO (CBR) IN FIELD FOR THE SOIL SUBASSERANT OF THE VIA PORTOVIEJO-MANTA"

Joan Castillo Morejón¹, Lenin Mena Garzón²

Resumen

La vía Portoviejo – Manta es una arteria principal de comunicación terrestre de la provincia de Manabí, es un eje fundamental en el desarrollo económico, social y turístico del país. Para el gobierno autónomo descentralizado de la provincia de Manabí es primordial su ampliación proponiendo una extensión de sus cuatro carriles a seis, para ello es importante un análisis integral que involucre un estudio de tráfico, geológico y geotécnico. Por consiguiente, esta investigación evaluara las condiciones del terreno de cimentación de la vía, proponiendo una correlación entre DCP y CBR, planteando la posibilidad de la utilización del Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) para valorar las propiedades de resistencia in situ del terreno. Por medio del método estadístico de regresión se efectuaron dos ecuaciones utilizando para valores de CBR 0.1", 0.2" y DCP arrojando con el primer valor un coeficiente de

Abstract

The Portoviejo - Manta road is a main artery of terrestrial communication in the province of Manabí, it is a fundamental axis in the economic, social and tourist development of the country. For the decentralized autonomous government of the province of Manabí it is essential to expand it by proposing an extension of its four tracks to six, for which an integral analysis involving a traffic, geological and geotechnical study is important. Therefore, this research will evaluate the conditions of the road cement ground, proposing a correlation between DCP and CBR, raising the possibility of using the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) to assess the resistance properties in situ of the land. By means of the statistical method of regression, 2 equations were made using for values of CBR 0.1", 0.2" and DCP giving with the first value a correlation coefficient R^2 equal to 0.80 and in the second a correlation coefficient R^2 equal to 0.82 was obtained, being acceptable values with proximity to one. A third and fourth

¹ Estudiantes carrera de ingeniería Civil-Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito-Ecuador
Autores para correspondencia: lmenag@est.ups.edu.ec; jcastillo4@est.ups.edu.ec
Tutor: Hugo Florencio Torres Merino; htorres@ups.edu.ec

correlación R^2 igual al 0,80 y en la segunda se obtuvo un R^2 igual al 0,82, siendo valores aceptables con proximidad a uno. Se efectuó una tercera y cuarta ecuación de regresión múltiple el cual se consideró valores de CBR 0.1", 0.2" y DCP más sus parámetros físicos con resultados de la primera ecuación R^2 igual al 0,82 y en la segunda un R^2 igual al 0,86 indicando que en cada uno de los casos analizados las estimaciones muestrales de R^2 admiten una correlación aceptable.

Palabras Clave: Coeficiente de correlación (R^2), Cono Dinámico de Penetrómetro (DCP), Correlación, Geotécnico, Relación de Soporte de California (CBR).

multiple regression equation were made which was considered values of CBR 0.1", 0.2" and DCP plus their physical parameters with results of the first equation R^2 equal to 0.82 and in the second an R^2 equal to 0.86 indicating that in each of the cases analyzed the sample estimates of R^2 admit an acceptable correlation.

Key Words: Correlation Coefficient (R^2), Dynamic Cone Penetrometer (DCP), Correlation, Geotechnical California Bearing Ratio (CBR).

1. Introducción

El CBR (Relación de Soporte de California) en campo es un ensayo que determina la capacidad de soporte del suelo in situ evaluando la calidad de la subrasante, subbase y base de pavimentos, mediante la aplicación de una carga para alcanzar los esfuerzos requeridos, provocando la penetración en el suelo. [1] Desde esta visión del proceso, emplear el (CBR) en campo facilita la obtención de resultados con rapidez.

El ensayo DCP (Penetrómetro Dinámico de Cono) realizado en campo con ayuda del dispositivo de cono de penetración calcula la penetración dinámica por golpes en el suelo representando la resistencia de corte en sitio de los materiales, por lo tanto, aporta una idea de las condiciones reales en las que se encuentran los elementos de los diferentes estratos analizados en el instante en el que se realiza el ensayo.[2]

Sobre la validez de lo antes descrito para establecer las correlaciones se procedió a la realización del ensayo denominado penetrómetro dinámico de cono (DCP) cada 500 metros aproximadamente para obtener el número de golpes por penetración por milímetro, adicional a esto se realizó el ensayo de soporte de california (CBR) en campo cada 1000 metros aproximadamente, paralelamente a los ensayos se procedió con la extracción de muestras las cuales se obtuvieron de manera sistemática tanto al lado izquierdo como al lado derecho de la longitud total de la vía.

La presente investigación consiste en establecer una correlación simple entre el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) y la Relación de Soporte de California (CBR), además de una correlación múltiple entre (CBR) y parámetros físicos del suelo de subrasante de la vía antes mencionada.

Estas correlaciones se establecerán mediante un análisis estadístico tanto de regresión lineal simple de igual manera de regresión lineal múltiple tomando en cuenta el coeficiente de correlación (R) y p-valor los cuales determinarán si la correlación puede ser empleada o no para el caso de estudio.

2. Materiales y Métodos

La investigación se llevó a cabo en la vía Portoviejo-Manta ubicada en la provincia de Manabí donde se efectuaron 56 sondeos superficiales (calicatas), procediendo a extraer dichas muestras realizando los ensayos antes mencionados mediante el sistema de coordenadas UTM WGS-84 zona 17S, dichas muestras fueron georreferenciadas. Se presentan los valores en la tabla 1 anexa.

Tabla 1: Coordenadas de los puntos de muestreo

Calicata	UTM WGS 84	
	ESTE	SUR
C-1	557804,9344	9881846,544
C-2	558279,1426	9881943,469
C-3	557304,3493	9881697,461
C-4	556836,7032	9881579,632
C-5	556346,357	9881439,577
C-6	555823,2947	9881260,619
C-7	555353,8674	9881124,562
C-8	554861,9709	9881016,528
C-9	554460,8679	9880940,412
C-10	553807,8655	9880810,572
C-11	553445,1474	9880730,448
C-12	552895,6305	9880683,181
C-13	552432,7842	9880630,672
C-14	551929,8813	9880553,862
C-15	551427,89	9880614,6
C-16	551003,7033	9880904,042
C-17	550530,4343	9881083,156
C-18	550133,1709	9881370,294
C-19	549730,5653	9881649,439

2.2 Metodología

2.2.1 Ensayos de campo

Para la obtención de la densidad del suelo que conforma la subrasante y el porcentaje de humedad, se empleó el densímetro nuclear. El densímetro nuclear es un equipo electrónico de medición capaz de determinar rápidamente y con precisión el porcentaje de humedad y la densidad de suelos o agregados y asfalto, directamente en el sitio, sin tener que recurrir al laboratorio, lo que conllevaría a mayor tiempo de espera, que en la mayoría de los casos no se cuenta, por la celeridad de las obras [3], de acuerdo la normativa ASTM D2922. Se presentan los valores en la Tabla 2 anexa.

Tabla 2: Datos de las propiedades físicas del suelo de la subrasante de la vía Portoviejo-Manta.

Abscisa	Calicata	Densidad Húmeda Natural de la Subrasante (Kg/m3)	Densidad Seca Natural de la Subrasante (Kg/m3)	Contenido de Agua Natural
0+030	C-1	1704	1316	29.5
1+000	C-3	1933	1613	19.8
2+010	C-5	1716	1215	41.2
2+990	C-7	1911	1593	20
3+900	C-9	1637	1145	43
5+000	C-11	1988	1684	18
6+000	C-13	1780	1306	36.4
7+000	C-15	1652	1351	22.3
8+000	C-17	2068	1781	16.1
9+000	C-19	1814	1537	18
10+000	C-21	1807	1489	21.3
11+000	C-23	1849	1505	22.9
12+020	C-25	1532	1192	28.5
13+020	C-27	1718	1342	28.1
14+080	C-29	1510	1609	41.2
15+000	C-31	1222	929	31.6
16+000	C-33	1910	1818	47.3
17+030	C-35	1451	970	49.5
17+980	C-37	1653	1179	40.3
19+090	C-39	1629	1162	40.2
20+000	C-41	1459	1043	39.9
21+000	C-43	1841	1441	27.8
21+980	C-45	1869	1609	16.2
23+040	C-47	1857	1496	24.1
24+100	C-49	1519	1257	20.9
25+000	C-51	1635	1276	28.1

26+025	C-53	1838	1499	22.7
26+500	C-54	1750	1400	25
27+100	C-55	1659	1517	9.3
27+500	C-56	1584	1157	36.9

Luego de haber obtenidos los datos antes expuestos se realizó el ensayo de soporte de california (CBR) en campo se presentan los valores en la tabla 3 anexa, este ensayo se realiza para evaluar la calidad de respuesta del suelo de la subrasante, también es aplicable para sub-base, probado en el lugar por la carga de penetración del suelo, dicho ensayo se adapta a los procedimientos viables y sus condiciones en campo, este ensayo consiste en la aplicación de carga para obtener los esfuerzos requeridos provocando la penetración en el suelo, los procedimientos a seguir deben ser los Normados en la ASTM D4429-04.[4]

Tabla 3: Valores de CBR 0.1" y CBR 0.2"

Abscisa	CBR 0,1	CBR 0,2
0+030	4,1	4,6
1+000	10,8	11,0
2+010	3,2	3,2
2+990	5,7	5,1
3+900	0,3	0,2
5+000	6,7	6,5
6+000	1,6	1,3
7+000	7,0	6,3
8+000	11,4	11,6
9+000	2,9	2,5
10+000	7,0	9,5
11+000	0,0	0,0
12+020	13,6	16,5
13+020	3,2	3,2
14+080	3,2	3,0
15+000	2,9	2,5
16+000	2,2	2,1
17+030	2,5	2,5
17+980	5,1	4,6
19+090	10,8	11,4
20+000	3,8	4,0
21+000	3,5	4,0
21+980	8,9	10,8
23+040	0,0	0,0
24+100	14,3	7,2
25+000	13,9	12,7
26+025	2,9	3,8
26+500	17,4	14,1
27+100	23,8	22,6
27+500	1,6	1,3

El ensayo con penetrómetro dinámico de cono (DCP) se realiza in situ con la ayuda del dispositivo de cono de penetración, se utiliza por la facilidad y practicidad con respecto a los ensayos convencionales en campo, es una herramienta útil y confiable siempre que se realice un adecuado uso e interpretación. En este sentido se comprende que el ensayo (DCP) consiste en medir la penetración dinámica provocada por golpe, representando la resistencia al corte in situ de los materiales, por lo tanto, es indicado para evaluar la resistencia del material bajo las condiciones existentes, se rige bajo la normativa ASTM D6951-03.[5]

Se presentan los valores en la Tabla 4 anexa.

Tabla 4: Valores de DCP

Abscisa	Calicata	DCP
0+030	C-1	18,76
1+000	C-3	24
2+010	C-5	44,44
2+990	C-7	25
3+900	C-9	50
5+000	C-11	30
6+000	C-13	175
7+000	C-15	17,78
8+000	C-17	23,08
9+000	C-19	250
10+000	C-21	35,72
11+000	C-23	10,34
12+020	C-25	16,66
13+020	C-27	46,66
14+080	C-29	75
15+000	C-31	75
16+000	C-33	85,72
17+030	C-35	63,64
17+980	C-37	50
19+090	C-39	29,72
20+000	C-41	50
21+000	C-43	34,48
21+980	C-45	31,42
23+040	C-47	5,72
24+100	C-49	36,84
25+000	C-51	40,54
26+025	C-53	15,16

26+500	C-54	55,56
27+100	C-55	12,82
27+500	C-56	66,66

2.2.2 Ensayos de Laboratorio

Ensayos Físicos, este tipo de ensayos tienen como objetivo caracterizar el material, definiendo propiedades que son particulares de cada suelo.

Tabla 5: Ensayos / Normas

Ensayo (Propiedad a determinar)	Normativa
Granulometría por tamizado	ASTM D-422
Clasificación AASHTO	ASTM D-3282
Clasificación SUCS	ASTM D-2487
Limite Líquido	ASTM D-4318
Limite Plástico	ASTM D-4318

Dado que el objetivo de estudio es evaluar las características del suelo de subrasante de la vía Portoviejo-Manta se procedió a evaluar las muestras de suelo recolectadas a diferentes profundidades en el laboratorio para determinar: el contenido de humedad, límite líquido, límite plástico y por consecuencia la granulometría, con los datos obtenidos en el laboratorio se realizó la clasificación ASSHTO y SUCS, con los resultados obtenidos se procede a la aplicación del método estadístico de regresión, hallándose dos ecuaciones de correlación exponencial entre el penetrómetro dinámico de cono (DCP) y el ensayo de relación de soporte de california (CBR) al 0.1" y 0.2" en campo respectivamente. Adicional a la correlación antes mencionada se llevó a cabo la correlación múltiple exponencial entre el ensayo de relación de soporte de california (CBR) al 0.1" y 0.2" en campo y el penetrómetro dinámico de cono (DCP), además de los parámetros físicos del suelo de subrasante (Contenido de Agua, Densidad Natural, Granulometría), además mediante un análisis ANOVA se determinó que parámetros físicos influyen de manera

considerable en la obtención del CBR in situ. Posterior a lo antes planteado se llevó a cabo un análisis estadístico mediante el método de diferencia de medias el cual corroborara si la correlación es aplicable en otras zonas.

C-45	NP	NP	NP	31,4	8,9	10,8
C-47	0	21,5	78,5	5,7	0	0
C-49	1,7	27,6	70,7	36,8	14,3	7,2
C-51	NP	NP	NP	40,5	13,9	12,7
C-53	NP	NP	NP	15,1	2,9	3,8
C-54	0,7	25,8	73,5	55,5	17,4	14,1
C-55	NP	NP	NP	12,8	23,8	22,6
C-56	0	6,7	93,3	66,6	1,6	1,3

3. Resultados y Discusión

Sobre la validez de los resultados obtenidos en campo, a través de los ensayos de penetrómetro dinámico de cono (DCP), relación de soporte de California (CBR), densidad y contenido de agua por el método nuclear, el valor de CBR in situ se obtuvo con la formula proporcionada por la norma ASTM D6951-03, a partir de los datos generados por el ensayo DCP.

Para tal efecto se presenta la siguiente tabla 6, la cual indica el número de sondeos superficiales, el porcentaje de grava, el porcentaje de arena, porcentaje de finos, así como el valor que se obtuvo del DCP y los valores de CBR 0.1" y CBR 0.2".

Tabla 6: Valores de % Grava, % Arena, % Finos y CBR 0.1", 0.2"

Calicata	%Grava	%Arena	%Finos	DCP	CBR 0,1	CBR 0,2
C-1	41,6	23,6	34,8	18,7	4,1	4,6
C-3	54,6	22	23,4	24	10,8	11
C-5	16,7	11,2	72,1	44,4	3,2	3,2
C-7	NP	NP	NP	25	5,7	5,1
C-9	5	9,6	85,4	50	0,3	0,2
C-11	16,9	16,6	66,5	15	6,7	6,5
C-13	6,9	26,9	66,3	175	1,6	1,3
C-15	0,3	10,5	89,3	17,7	7	6,3
C-17	NP	NP	NP	23,0	11,4	11,6
C-19	NP	NP	NP	250	2,9	2,5
C-21	12	31,7	56,2	35,7	7	9,5
C-23	NP	NP	NP	10,3	0	0
C-25	15,5	37,5	47,1	16,6	13,6	16,5
C-27	15,2	33	51,8	46,6	3,2	3,2
C-29	NP	NP	NP	75	3,2	3
C-31	0	15,7	84,3	75	2,9	2,5
C-33	0	17,3	60,4	85,7	2,2	2,1
C-35	3	45,2	51,8	63,6	2,5	2,5
C-37	0,2	11,8	88	50	5,1	4,6
C-39	21,1	32,2	46,8	29,7	10,8	11,4
C-41	0	23,2	76,8	100	3,8	4
C-43	NP	NP	NP	34,4	3,5	4

En base a los datos de granulometría obtenidos en laboratorio se procedió a clasificar el suelo por el método SUCS y AASHTO, a continuación, se presenta en la tabla 7 los resultados obtenidos:

Tabla 7: Clasificación SUCS y AASHTO del suelo que constituye la subrasante de la vía Portoviejo-Manta

Abscisa	Calicata	Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO
0+030	C-1	CH	A-2-7
0+500	C-2	CL	A-6
1+000	C-3	CH	A-2-7
1+500	C-4	CH	A-7-5
2+000	C-5	CH	A-7-5
2+560	C-6	CH	A-2-6
3+600	C-8	CH	A-7-5
3+900	C-9	CH	A-7-5
4+600	C-10	CH	A-7-5
5+000	C-11	CH	A-7-5
5+550	C-12	NP	NP
6+000	C-13	CH	A-7-6
6+500	C-14	CH	A-7-5
7+000	C-15	CH	A-7-5
7+500	C-16	NP	NP
8+000	C-17	NP	NP
8+500	C-18	CH	A-7-5
9+000	C-19	NP	NP
9+524	C-20	CL	A6
10+000	C-21	MH	A-7-5
10+500	C-22	CH	A-7-5
11+000	C-23	NP	NP
11+510	C-24	MH	A-7-5
12+020	C-25	CL	A-7-6
12+500	C-26	CL	A-7-6
13+020	C-27	CL	A-7-5
13+580	C-28	CL	A-7-5
14+080	C-29	CL	A-7-5
14+500	C-30	CL	A-7-6
15+000	C-31	CL	A-7-6
15+500	C-32	CL	A-7-6
16+000	C-33	CH	A-7-6
16+530	C-34	MH	A-7-6
17+030	C-35	CL	A-7-6
17+500	C-36	CH	A-7-6
17+980	C-37	CH	A-7-6
18+570	C-38	CH	A-7-6
19+090	C-39	CL	A-7-6
19+500	C-40	CL	A-7-6

20+000	C-41	ML	A-7-6
20+570	C-42	CH	A-7-6
21+000	C-43	NP	NP
21+500	C-44	CL	A-7-6
21+980	C-45	NP	NP
22+480	C-46	NP	NP
23+040	C-47	CH	A-7-6
23+535	C-48	NP	NP
24+100	C-49	CL	A-7-6
24+500	C-50	NP	NP
25+000	C-51	NP	NP
25+500	C-52	NP	NP
26+025	C-53	NP	NP
26+500	C-54	CL	A-7-6
27+100	C-55	NP	NP
27+500	C-56	CH	A-7-6

Como resultado de la Clasificación SUCS se puede apreciar un mayor porcentaje de arcilla de alta y baja plasticidad como se muestra en la siguiente figura 3:

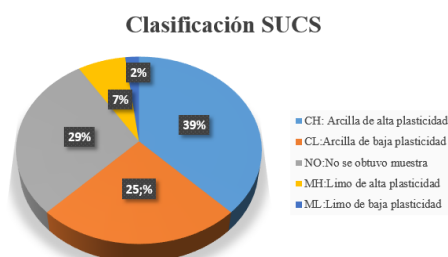


Figura 3. Clasificación SUCS del suelo que constituye la subrasante de la vía Portoviejo – Manta.

Mientras que por la clasificación AASHTO se obtuvo en mayor porcentaje Arcillas con calificación de regular a malo como se muestra en la siguiente figura 4:

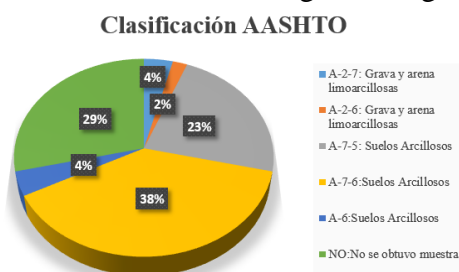


Figura 4. Clasificación AASHTO del suelo que constituye la subrasante de la vía Portoviejo – Manta.

Previo a la obtención de las correlaciones se realizó un análisis ANOVA con el fin de determinar que parámetros influyen directamente en el

cálculo del CBR, teniendo como resultado que ninguna de las variables consideradas (densidad natural, contenido de humedad y granulometría) no influyen directamente en la obtención del CBR, además se eliminó varios datos atípicos, al no presentar una distribución normal ya que afectaría el propósito de la investigación.

Tabla 8: Valores empleados para encontrar la correlación

CBR 0,1"	CBR 0,2"	DCP	Contenido Humedad	Finos	Grava
10,8	10,9	24	19,8	23,4	54,64
3,1	3,2	44,4	41,2	72,1	16,67
6,7	6,5	30	18	66,5	16,92
6,9	9,5	35,6	21,3	56,2	12
13,6	16,5	16,6	28,5	47,1	15,5
3,1	3,2	46,6	28,1	51,8	15,2
2,9	2,5	75	31,6	84,3	0
2,2	2,1	85,6	47,3	60,4	0
2,5	2,5	63,6	49,5	51,8	2,9
5,1	4,6	50	40,3	87,9	0,2
10,8	11,4	29,6	40,2	46,8	21,1
2	2	66,6	36,9	93,3	0

Para demostrar la correlación simple existente entre el ensayo CBR versus DCP, además de la correlación múltiple del ensayo CBR versus el ensayo DCP a más de los parámetros físicos del suelo (Contenido de Humedad, %grava, %finos) para un suelo de subrasante, es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros estadísticos como son:

El coeficiente de correlación R² en conjunto con el p-valor, los dos parámetros antes mencionados determinan el grado de correlación entre las variables y su fiabilidad. Las correlaciones fueron realizadas por el método de mínimos cuadrados, y se comparó las tendencias lineal, exponencial, logarítmica y polinómica, dando como resultado una tendencia exponencial como el mejor ajuste para la correlación simple, mientras que para la correlación múltiple se tiene un ajuste con una tendencia lineal.

Las ecuaciones encontradas con los datos que se muestra en la tabla 8 corresponden a:

a) Función exponencial en donde la variable independiente es el DCP y la variable dependiente es el CBR-0.1”.

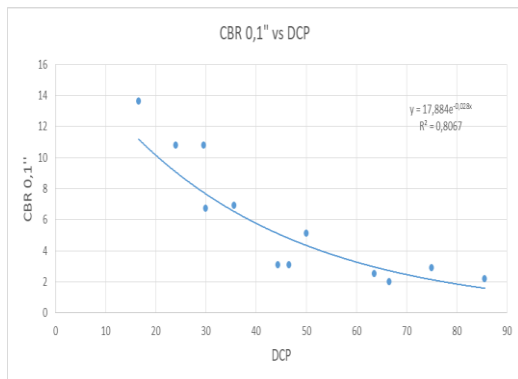


Figura 5. Ec. Exponencial 1:

$$\text{CBR} = 17.884 * \exp^{-0.057 \text{DCP}} \quad (1)$$

Coefficiente de correlación: $R^2=0.80$; p-valor: 7.246×10^{-5}

b) Función exponencial en donde la variable independiente es el DCP y la variable dependiente es el CBR-0.2”.

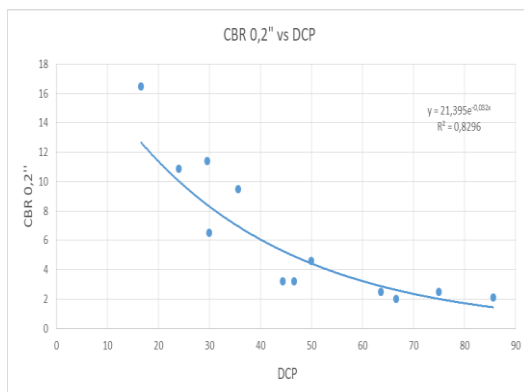


Figura 6. Ec. Exponencial 2:

$$\text{CBR} = 21.395 * \exp^{-0.063 \text{DCP}} \quad (2)$$

Coefficiente de correlación: $R^2=0.82$; p-valor: 3.821×10^{-5}

c) Ecuación múltiple exponencial la cual las variables independientes son el DCP, Contenido de Humedad, % Grava, %

de Finos y la variable dependiente es el CBR 0.1”.

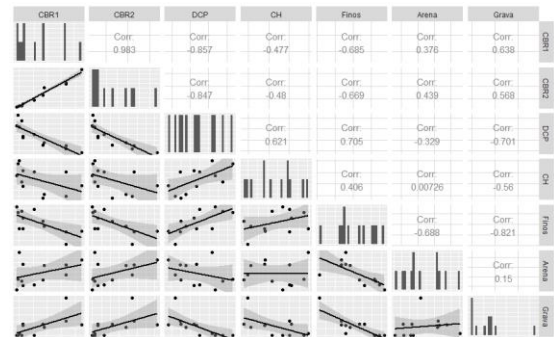


Figura 7. Ecuación Múltiple 1:

$$\text{CBR} = 28.97173 * \exp^{-(0.026553 * \text{DCP}) - (0.00251 * \text{CH}) - (0.006708 * \text{Finos}) - (0.005040 * \text{Grava})} \quad (3)$$

Coefficiente de correlación: $R^2=0.82$; p-valor: 0.0091

d) Ecuación múltiple exponencial la cual las variables independientes son el DCP, Contenido de Humedad, % Grava, % de Finos y la variable dependiente es el CBR 0.2”.

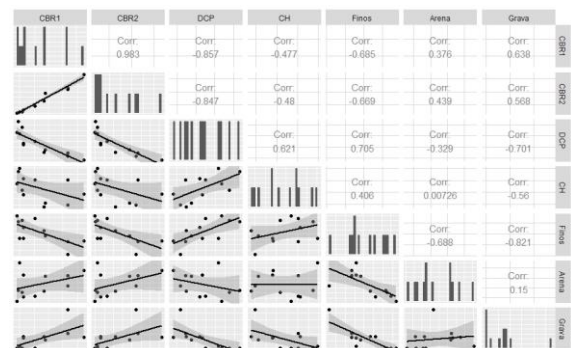


Figura 8. Ecuación Múltiple 2:

$$\text{CBR} = 55.77653 * \exp^{-(0.030318 * \text{DCP}) - (0.005405 * \text{CH}) - (0.01093 * \text{Finos}) - (0.012225 * \text{Grava})} \quad (4)$$

Coefficiente de correlación: $R^2=0.86$; p-valor: 0.0039

Comparando los valores de CBR obtenidos mediante las ecuaciones exponenciales y múltiples, con los valores de CBR obtenidas por medio de las ecuaciones propuestas por la norma ASTM D6951-03, se obtuvo las siguientes tablas 9 y 10 respectivamente:

Ecuaciones propuestas por la norma ASTM D6951-03:

Para Todo tipo de suelo excepto aquellos que califiquen como Arcilla de baja plasticidad (CL) con CBR menor a 10, ni tampoco suelos calificados como Arcilla de Alta plasticidad (CH). [8]

$$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}} \quad (5)$$

- Para suelos tipo CL. Con $CBR < 10\%$.

$$CBR = \frac{1}{(0.017019 * DCP)^2} \quad (6)$$

- Para Suelos tipo CH.

$$CBR = \frac{1}{0.002871 * DCP} \quad (7)$$

A continuación, se realiza:

Cálculo del CBR para 0,1" con las ecuaciones obtenidas en este estudio y se compara con la ecuación propuesta por la norma ASTM D6951-03.

Tabla 9: Comparación de resultados (CBR-0.1") con la ecuación de la Norma ASTM D-6951

DCP	Ec. Norma ASTM D-6951-03 (CBR)	Ec. Exponencial 1 (CBR)	Ec. Múltiple 1 (CBR)
24	14,5	9,07	9,46
44,4	7,8	5,10	4,56
30	11,6	7,66	7,34
35,6	5,3	6,54	6,89
16,6	12,6	11,19	11,70
46,6	1,6	4,79	5,13
75	0,6	2,15	2,08
85,6	4,1	1,59	1,77
63,6	0,9	2,96	3,29
50	7,0	4,35	3,85
29,6	3,9	7,75	7,84
66,6	5,2	2,72	2,41

Análisis comparativo entre la ecuación exponencial (1), ecuación múltiple (3), y ecuaciones propuestas por la norma ASTM D-6951-03.

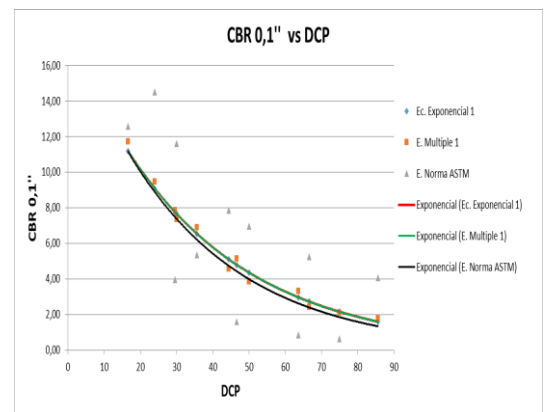


Figura 9. Análisis comparativo CBR vs DCP

Cálculo del CBR para 0,2" con las ecuaciones obtenidas en este estudio y se compara con la ecuación propuesta por la norma ASTM D6951-03.

Tabla 10: Comparación de resultados (CBR-0.2”) con la ecuación de la Norma ASTM D-6951

DCP	Ec. Norma ASTM D-6951-03 (CBR)	Ec. Exponencial 2 (CBR)	Ec. Múltiple 2 (CBR)
24	14,5	10,04	9,61
44,4	7,8	5,28	4,31
30	11,6	8,31	8,01
35,6	5,3	6,97	7,89
16,6	12,6	12,68	14,29
46,6	1,6	4,93	5,50
75	0,6	2,01	1,93
85,6	4,1	1,44	1,67
63,6	0,9	2,88	3,40
50	7,0	4,43	3,76
29,6	3,9	8,42	8,48
66,6	5,2	2,62	2,19

Análisis comparativo entre la ecuación exponencial (2), ecuación múltiple (4), y ecuaciones propuestas por la norma ASTM D-6951-03.

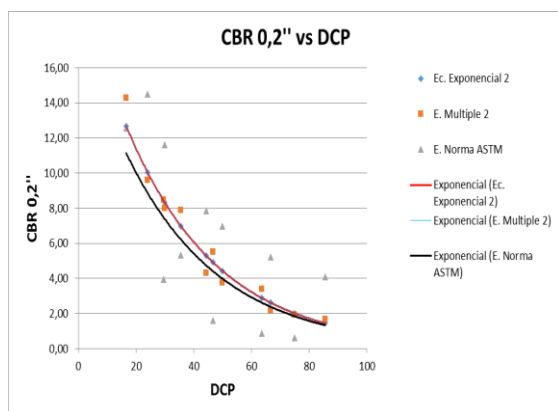


Figura 10. Análisis comparativo CBR vs DCP

4. Conclusiones

Luego del análisis y discusión de resultados se concluye lo siguiente:

Las correlaciones realizadas en este estudio permitirán emplear la utilización del ensayo de penetrómetro dinámico de cono (DCP) para determinar el valor de soporte del suelo, siempre y cuando los parámetros sean similares a los empleados en este artículo. Con los resultados obtenidos de los suelos que conforman la subrasante de la vía Portoviejo-Manta se elaboraron cuatro ecuaciones, dos de carácter exponencial y dos de carácter múltiple exponencial las cuales serán detalladas a continuación:

1) El CBR 0,1” versus la pendiente DCP tienen una correlación muy alta ya que su valor de correlación es de 0,80, con p-valor de 7.246×10^{-5} , se ve representado por la ecuación exponencial 1:

$$\text{CBR} = 17.884 * \exp^{-0.032 \text{DCP}} \quad (1)$$

2) El CBR 0,2” versus la pendiente DCP tienen una correlación muy alta ya que su valor de correlación es de 0,83, con p-valor de 3.821×10^{-5} , se ve representado por la ecuación exponencial 2:

$$\text{CBR} = 21.395 * \exp^{-0.032 \text{DCP}} \quad (2)$$

3) El CBR 0,1” versus la pendiente DCP además de los parámetros físicos del suelo de subrasante (Contenido de humedad, %Finos, %Grava), tienen una correlación estadísticamente alta ya que su valor de correlación es de 0,82, con p-valor de 0.0091, se ve representado por la ecuación múltiple 1:

$$\text{CBR} = 28.97173 * \exp^{(-(0.026553 * \text{DCP}) - (0.00251 * \text{CH}) - (0.006708 * \text{Finos}) - (0.005040 * \text{Grava}))} \quad (3)$$

4) El CBR 0,2” versus la pendiente DCP además de los parámetros físicos del suelo de subrasante (Contenido de humedad, %Finos, %Grava), tienen una correlación muy alta ya que su valor de correlación es de 0,86, con p-valor de 0.0039, se ve representado por la ecuación múltiple 2:

$$\text{CBR} = 55.77653 * \exp^{(-(0.030318 * \text{DCP}) - (0.005405 * \text{CH}) - (0.01093 * \text{Finos}) - (0.012225 * \text{Grava}))} \quad (4)$$

Estas ecuaciones son válidas para suelos clasificados de acuerdo con SUCS (Arcillas de alta plasticidad (CH) y Arcillas de baja plasticidad (CL)) y de acuerdo con AASHTO (Suelos Arcillosos (A-7-6 y A-7-5)), además con límite líquido entre (35-97) e índice de plasticidad entre (13-63).

Por otra parte se realizó una comparación entre las ecuaciones obtenidas en este estudio con la ecuación de la norma ASTM D-6951-03, para el cálculo de CBR donde se puede concluir que:

- Para determinar el valor del CBR para 0.1” se recomienda utilizar la Ecuación múltiple exponencial (3), ya que como se exponen en los resultados su grado de correlación es cercano a la unidad, además como se muestra en la figura 9, la línea de tendencia para la ecuación múltiple exponencial 1 y la ecuación exponencial 1 coinciden en gran medida, sin embargo, es preferible utilizar la ecuación múltiple puesto que involucra a parámetros físicos que describen el tipo de suelo de la subrasante.

- Para determinar el valor del CBR para 0.2” se recomienda utilizar la Ecuación múltiple exponencial (4), ya que como se expone en los resultados su grado de correlación es muy alto, además como se muestra en la figura 10, Para determinar

el valor del CBR para 0.2” se recomienda utilizar la Ecuación múltiple exponencial (4), ya que como se expone en los resultados su grado de correlación es muy alto, además como se muestra en la figura 10, la línea de tendencia para la ecuación múltiple exponencial 2 y la ecuación exponencial 2 coinciden en gran medida, sin embargo, se recomienda recurrir a la ecuación múltiple puesto que involucra a parámetros físicos que describen el tipo de suelo de la subrasante.

- La utilización de las ecuaciones exponenciales múltiples (3) y (4), para CBR 0.1’’ o CBR 0.2’’, dependerá del criterio del profesional calificado el cual evaluará el valor de CBR que empleará para sus fines.

- El análisis ANOVA nos indica que, para la regresión simple, la variable DCP tiene una alta significatividad para la ecuación exponencial (1) y (2).

- Las ecuaciones múltiples a pesar de tener un grado de correlación muy alto, el análisis estadístico ANOVA nos indica que las variables consideradas no son significativas, esto se debe a que este análisis es limitado, puesto que solo puede analizar variables que sean del mismo universo.

- El análisis estadístico de diferencia de medias indica que no existe una diferencia significativa de medias entre las ecuaciones obtenidas en este estudio vs las ecuaciones propuestas por la norma, por lo que es aceptable la utilización de las ecuaciones exponenciales múltiples (3) y (4).

Referencias

- [1] J. Auqui, D. Ramírez, “Guía práctica para el diseño estructural de carreteras” Trabajo de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana Feb. 2019.
- [2] J. Auqui, D. Ramírez, “Guía práctica para el diseño estructural de carreteras” Trabajo de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana Feb. 2019.
- [3] S. Guerrón, “Comparación de resultados de densidad de campo por los métodos cono y arena, volumétrico y densímetro nuclear” Trabajo de graduación, Universidad Central del Ecuador, Ecuador. Abril. 2013.
- [4] J. Auqui, D. Ramírez, “Guía práctica para el diseño estructural de carreteras” Trabajo de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana Feb. 2019.
- [5] J. Auqui, D. Ramírez, “Guía práctica para el diseño estructural de carreteras” Trabajo de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana Feb. 2019.
- [6] American Society of Materials (2017) Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils: ASTM D-4318.
- [7] American Society of Materials (2004) Standard Test Methods for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in place. ASTM D4429-04.
- [8] American Society of Materials (2003) Standard Test Methods for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications. ASTM D6951-03.
- [9] American Society of Materials (2012) Standard Test Methods for Density of Soil and soil-aggregate in place by nuclear methods. Shallow depth ATSM D2922-12.
- [10] American Society of Materials (1997) Standard Test Methods for Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. ASTM D3282-97.
- [11] American Society of Materials (2007) Standard Test Methods for Particle-size analysis of soils. ASTM D422-07.
- [12] American Society of Materials (2017) Standard Test Methods for Classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM D2487-17.